УДК 621.891

**С.П. Шимчук[1], П.П. Савчук[1], О.П. Герасимчук[1], О.В. Кущев[2]**
*[1]Луцький національний технічний університет*
*[2]Національний авіаційний університет*

# ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНО-ТУРБУЛЕНТНОГО МЕТОДУ ОЧИЩЕННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

***Показано, що найбільш ефективним способом очищення поверхонь тертя підшипників кочення є безконтактний магнітно-турбулентний вплив як на робочі поверхні підшипників так і на мікрочастини забруднень, що мають різну природу. Для пояснення такої взаємодії нами було досліджено та математично підтверджено як впливає конструкція підшипника на процес безконтактного очищення, обгрунтовано гідродинамічні умови, виконання яких є необхідною складовою ефективного очищення підшипників від забрудень***

***Ключові слова:*** *поверхні тертя, підшипник кочення, магнітно-турбулентне очищення, мікрочастинки*

**S. Shumchuk[1], P. Savchuk[1], O. Gerasymchuk[1], O. Kuschev[2]**
*[1]Lutsk National Technical University*
*[2]National Aviation University*

# PHYSICAL AND MATHEMATICAL RESEARCH OF MAGNETIC-TURBULANCE CLEANING METHOD OF ROLLING BEARINGS

***It is shown that the most effective method of cleaning the friction surfaces of rolling bearings is a non-contact magnetic-turbulance impact on the working surfaces of bearings and contamination of microparticles that have different nature. To explain this interaction we explored and mathematically proved how a bearing structure influences on the process of non-contact cleaning, justified hydrodynamic conditions, the implementation of which is a necessary component of effective bearings cleaning from contamination.***

***Keywords: friction*** *surfaces, rolling bearings, magnetic- turbulence cleaning, microparticles*

**С.П. Шымчук[1], П.П. Савчук[1], О.П. Герасымчук[1], О.В. Кущев[2]**
*[1]Луцкий национальный технический університет*
*[2]Национальный авиационный університет*

# ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНО-ТУРБУЛЕНТНОГО МЕТОДА ОЧИСТКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

***Показано, что наиболее эффективным способом очистки поверхностей трения подшипников качения является бесконтактное магнитно-турбулентное влияние как на рабочие поверхности подшипников так и на микрочастицы загрязнений, имеющих разную природу. Для объяснения такого взаимодействия нами было исследовано и математически доказано как влияет конструкция подшипника на процесс бесконтактной очистки, обоснованно гидродинамические условия, выполнение которых является необходимой составляющей эффективной очистки подшипников от загрязнений***

***Ключевые слова:*** *поверхности трения, подшипник качения, магнитно-турбулентная очистка, микрочастицы*

**Постановка проблеми.** Для видалення забруднень, що потрапляють на поверхні елементів підшипників кочення під час виробництва, експлуатації, ремонту тощо, існує велика кількість методів очищення. Ці методи використовують складні фізико-хімічні і механічні процеси. Ефективність методів очищення залежить від властивостей миючого середовища, розміру частинок, властивостей і характеру забруднень, технологічних режимів очищення, конструктивних особливостей деталей, агрегатів і систем, що очищуються. Навіть найбільш сучасні методи очищення не враховують особливості конструкції підшипників кочення, що суттєво погіршує якість видалення забруднень

**Аналіз досліджень та публікацій.** Тривалість процесу очищення деталей, агрегатів і систем сучасних машин, залежно від складності та класу точності, досягає 10-15% від загальних витрат часу на їх виготовлення та складання [1].

До особливостей конструкції підшипників кочення, що ускладнюють процес видалення забруднень, слід віднести:

- перекривання значної частки (від 30 до 90%) робочих поверхонь елементами конструкції (кільця, сепаратори, тіла кочення), через що ці поверхні при стаціонарному положенні підшипника в момент очищення не можуть бути ефективно очищені практично всіма існуючими методами [2];
- малий переріз щілин між елементами конструкції, тонкі канали порожнин складного профілю [2];

*© С.П. Шимчук, П.П. Савчук, О.П. Герасимчук, О.В. Кущев*

- феромагнітна природа переважної кількості елементів конструкції сучасних підшипників, що вносить магнітну складову в утримання забруднення на поверхнях [3-4].

Результатом є формування унікального комплексу проблем, вирішення котрих потребує особливого підходу.

**Мета дослідження.** Обґрунтування умов видалення механічних забруднень з поверхонь підшипників кочення за допомогою гідродинамічних процесів з подальшою розробкою ефективних методів і засобів їх очищення.

**Результати досліджень.** Процес очищення робочих поверхонь підшипників кочення, як і усіх деталей та агрегатів, машин і механізмів умовно розділяють на наступні етапи:

– відрив часток з поверхонь та їх зважування потоком рідини;

– транспортування часток забруднення із зони очищення до фільтруючих пристроїв;

– фільтрування миючої рідини.

Параметри гідродинамічного потоку при очищенні металевої поверхні деталі потоком миючої рідини визначають виходячи з теоретичного аналізу гідродинамічної взаємодії миючої рідини із частками забруднень, а також на підставі результатів експериментальних досліджень.

Розглянемо вплив складових сил на забруднення як за відомих методів та засобів, що ґрунтуються на використанні гідродинамічних сил, так і за розробленого магнітно-турбулентного методу очищення трибосистем кочення.

При взаємодії електромагнітних полів з поверхнями деталей підшипника кочення відбувається взаємне переміщення рухомих елементів його конструкції (розкручування підшипника), що перебуває в стадії очищення та формування гідравлічних потоків миючого середовища.

Модель процесу видалення забруднень та залишків змащувальних матеріалів з поверхонь деталей підшипників кочення побудована з використанням наступних припущень:

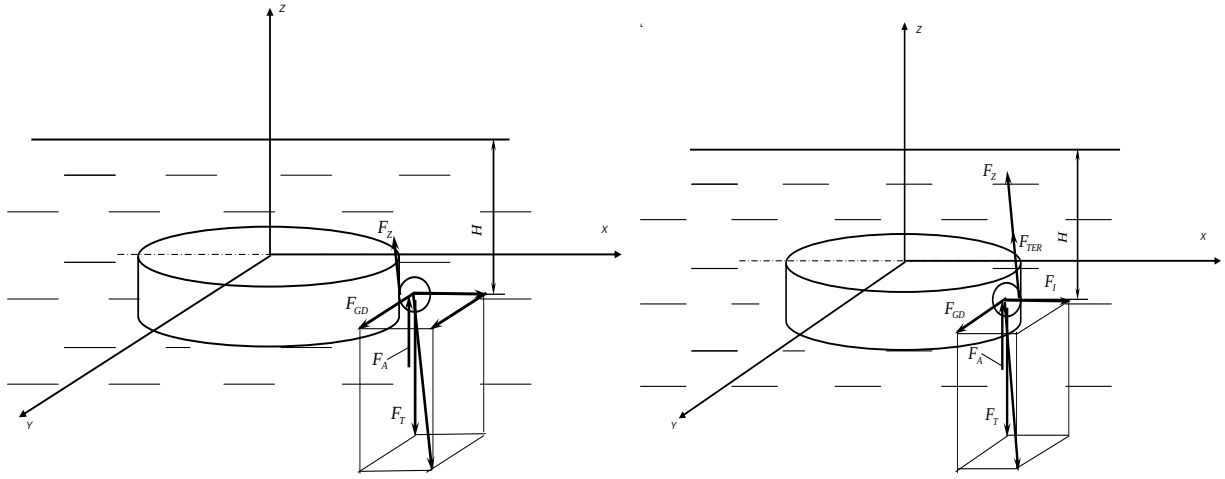
1. Частинка забруднення має сферичну форму.

2. Розглядається зовнішнє кільце підшипника, поверхня якого є ідеальним циліндром.

3. Сила зчеплення частинки забруднення з поверхнею підшипника не залежить від напрямку зміщення забруднення і спрямована протилежно до зміщення.

4. Взаємодія частинки забруднення з підшипником та рідиною з достатньою точністю описується законами класичної механіки та гідравліки.

Розглянемо сили, що діють на забруднення сферичної форми, яке міститься на поверхні кільця підшипника (рис. 1, а, б). Кільце підшипника обертається в миючій рідині.




*а* *б*

*Рис. 1.* **Сили, що діють на забруднення сферичної форми: *а* – на зовнішній поверхні кільця підшипника; *б* – на внутрішній поверхні кільця підшипника**

До сил, що діють на забруднення сферичної форми належать:

1. Сила тяжіння

$$F_T = mg\ , \tag{1}$$

де $m$ – маса частинки забруднення ,кг; $g$ – прискорення вільного падіння $g = 9,8$ м/с$^2$.

2. Сила зчеплення частинки забруднення з матеріалом кільця підшипника $F_Z$. Враховуючи, що матеріал забруднення варіюється, сила зчеплення також може мати різну природу, що ускладнює її теоретичне визначення і переводить цю задачу в область експериментальних досліджень.

3. Сила Архімеда, що прагне виштовхнути частинку забруднення з середовища,в якому вона знаходиться (очищувальної рідини):

$$F_A = \rho g V, \tag{2}$$

де $\rho$ – питома маса (густина) рідини, кг/м$^3$; $V$ – об'єм частинки забруднення, м$^3$.

Згідно прийнятого нами припущення, що частинка має сферичну форму:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3, \tag{3}$$

$r$ – радіус частинки.

Тоді з врахуванням (3) вираз (2) для визначення сили Архімеда прийме вигляд:

$$F_A = \frac{4}{3}\rho g \pi r^3. \tag{4}$$

Слід зазначити, що сила Архімеда діє не лише на частинку рідини, але й на обойму підшипника. Суттєвим вплив сили Архімеда є за умови, що питома маса матеріалу забруднення є менша за питому масу рідини або одного порядку з нею. Якщо $\rho_Z > \rho$ ($\rho_Z$ – питома маса забруднення кг/м$^3$), то сила Архімеда не чинить суттєвого впливу на видалення забруднення і її можна не враховувати.

Видалення деяких забруднень можливе ще до надання підшипнику певної частоти обертання на етапі занурення його в рідину.

При цьому можливі два випадки:

1) частинка забруднення спливає на вільну поверхню рідини, якщо

$$F_A > F_T + F_Z. \tag{5}$$

Підставивши в формулу (5) вирази (1), (4) отримаємо умову спливання забруднення на поверхню рідини за умови відсутності обертання підшипника

$$F_Z < \frac{4}{3}\rho g \pi r^3 - mg. \tag{6}$$

2) частинка забруднення опускається на дно миючої камери з рідиною

$$F_A + F_Z < F_T. \tag{7}$$

Підставивши в формулу (7) вирази (1), (4) отримаємо умову опускання забруднення на дно миючої камери з рідиною за умови відсутності обертання підшипника

$$F_Z < mg - \frac{4}{3}\rho g \pi r^3, \tag{8}$$

Аналіз формул (6) та (8) свідчить, що за значних сил зчеплення видалення частинок забруднення в статиці практично не можливо реалізувати. Гідростатичне видалення ефективне лише для частинок забруднень, маса яких на порядок відрізняється від маси рідни.

4. Відцентрова сила інерції

$$F_I = m\omega^2 R, \tag{9}$$

де $\omega = \pi n / 30$ – кутова швидкість обертання кільця підшипника, рад/с; $n$ – частота обертання кільця підшипника, об/хв., $R$ – відстань від центру обертання до центра мас частинки забруднення.

Слід зазначити, що для частинки забруднення, що міститься на зовнішній поверхні кільця підшипника, відцентрова сила сприяє видаленню забруднення, а для частинки, що міститься на внутрішній поверхні кільця підшипника (рис. 1, *б*), навпаки, ускладнює видалення забруднення, створюючи додаткову силу тертя між частинкою забруднення і кільцем підшипника:

$$F_{TER} = k_0 F_I, \tag{10}$$

де $k_0$ – коефіцієнт тертя спокою, що залежить від матеріалу забруднення та матеріалу кільця підшипника.

Тоді формула (10) з врахуванням (9) матиме вигляд:

$$F_{TER} = \frac{k_0 \pi^2 m n^2 R}{900}, \tag{11}$$

Тому, за значного підвищення частоти обертання підшипника видалення забруднень з внутрішніх поверхонь кільце підшипника може бути значно ускладнено, що обмежує верхню межу частоти обертання підшипника.

5. Сила опору руху частинки забруднення рідини, яка залежить від швидкості руху рідини (від режиму руху) і визначається:

а) для ламінарного режиму за формулою Стокса

$$F_{GD} = 6\pi\mu r\upsilon, \tag{12}$$

де $\mu$ –коефіцієнт динамічної в'язкості рідини Па · с; $\upsilon$ – середня швидкість рідини.

Для ламінарного режиму

$$\upsilon = u_{\max} / 2, \tag{13}$$

де $u_{\max}$ – максимальна швидкість.

В наслідок наявності в'язкості рідини її шари, що контактують з поверхнею кільця підшипника мають швидкість відносно рухомої поверхні близьку до нуля і рухаються з такою ж швидкістю (рис. 3, а, б). Тому максимальна швидкість:

$$u_{\max} = \omega R_1 = \frac{\pi n R_1}{30}. \tag{14}$$

де $R_1$ – відстань від центру обертання до точки контакту поверхні підшипника з забрудненням.

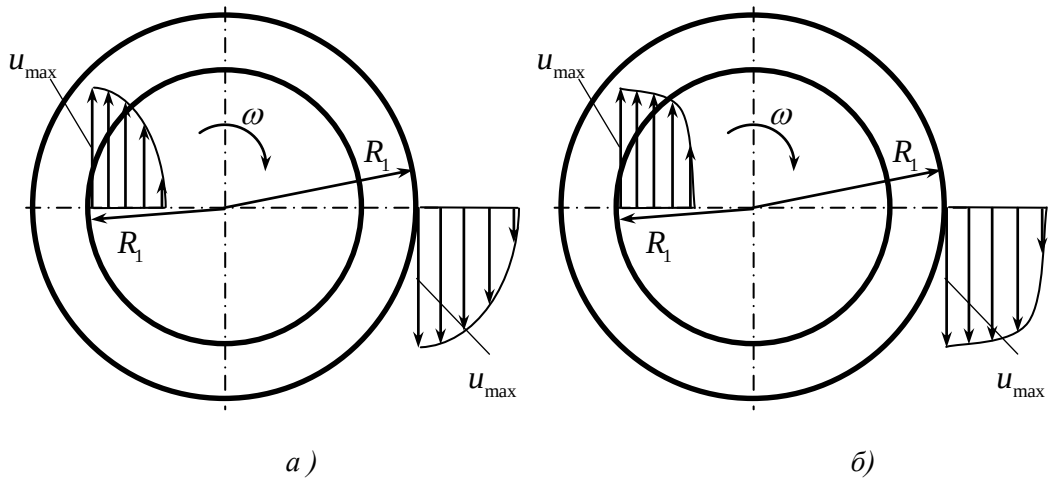



*Рис. 2.* **Розподіл швидкостей в контактному шарі з поверхнею кільця підшипника: *а* – за ламінарного руху; *б* – за турбулентного руху**

З урахуванням (13) та (14) формула Стокса (12) матиме вигляд

$$F_{GD} = \frac{\pi^2 \mu r n R_1}{10}. \tag{15}$$

б) для турбулентного режиму руху за законом Ньютона

$$F_{GD} = C_x \frac{\rho \upsilon^2}{2} S, \tag{16}$$

де $C_x$ – коефіцієнт лобового опору, що характеризує форму тіла;

$\upsilon$ – середня швидкість рідини. Для турбулентного режиму $\upsilon = u_{\max} / 1{,}15...1{,}3$. Приймемо

$$\upsilon = u_{\max} / 1{,}2, \tag{17}$$

$S$ – площа проекції тіла на площину, що перпендикулярна до напрямку руху. Для сферичної частинки забруднення

$$S = \frac{\pi r^2}{4}. \tag{18}$$

З врахуванням (14), (17), (18) формула (16) матиме вигляд

$$F_{GD} = C_x \frac{\pi^2 \rho n^2 R_1^2 r^2}{10368}. \tag{19}$$

Таким чином, для видалення забруднення під час обертання підшипника необхідно щоб виконувались наступні гідродинамічні умови:

А) для частинки, що міститься на зовнішній поверхні кільця підшипника:

$$\sqrt{F_{GD}^{\ 2} + \left(F_T - F_A\right)^2 + F_I^{\ 2}} > F_Z. \tag{20}$$

Б) для частинки, що міститься на внутрішній поверхні кільця підшипника:

$$\sqrt{F_{GD}^{\ 2} + \left(F_T - F_A\right)^2 + F_I^{\ 2}} - F_{TER} > F_Z. \tag{21}$$

**Висновки та рекомендації.** Характер переміщення електромагнітного поля забезпечує періодичне розмагнічування матеріалу підшипника, коли сумарний вектор протікання струмів в матеріалі дорівнює нулю і сили магнітної взаємодії забруднення з деталями підшипника зникають. При цьому під дією інших складових сил взаємодії частки забруднення переходять у миючий розчин при виконанні гідродинамічних умов (20), (21). В наступний відрізок часу, коли з'являється зовнішнє магнітне поле (МП) на частку буде діяти сила взаємодії магнітних зарядів, а так як напруженість зовнішнього МП більша за напруженість поля на поверхні деталей трибосистем кочення, це буде сприяти видаленню забруднення в потік в напрямку джерела змінного імпульсного магнітного поля.

**Література:**

1. *Абрамзон Л. А.* Поверхностно-активные вещества. Л.: Химия, 1975. 248 с. Тельнов Н. Ф. Технология очистки и мойки сельскохозяйственных машин. М.: Колос, 1973. 295 с

*2. Аксьонов О. Ф., Стельмах О. У., Костюнік Р. Є., Кущев О. В* Електромагнітна складова утворення феромагнітних забруднень.// Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2006. – Вип.46. – С. 91 – 102.

3. Аксьонов О.Ф., Костюнік Р.Є., Кущев О.В. Підвищення функціональної якості підшипників кочення шляхом електромагнітного очищення.//Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2008. – Вип.49. – Т. 1. С.9 – 13.

4. Белянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.

Стаття надійшла в редакцію 26.04.2016

© С.П. Шимчук, П.П. Савчук, О.П. Герасимчук, О.В. Кущев